



Efeito da amostragem sobre a distribuição espacial de contaminantes no solo

Adriana Lemos Porto¹, José Agnelo Soares¹ - ¹Universidade Federal de Campina Grande.

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This work aims a sampling mesh optimization to detect a possible contamination by volatile organic compounds (VOCs) in an area of storage of petroleum products, of around 20 hectares, where 2.361 soil samples were collected, 0.5 m, 1.0 m and 1.5 m deep, at each sampling point. The technique used was the ordinary kriging. The soil samples were analyzed by PID technique (Photon Ionization Detection). The strategy adopted was the analysis of krigged maps obtained from sampling with increasing reduction in the number of samples. Random and sequential sampling were adopted. Krigged maps were constructed with 100%, 75%, 50% and 25% of all available data, at each depth level. Mesh optimization was judged from three parameters: 1) the variography of each krigged map; 2) the RMS difference (Root Mean Square) between each krigged map with data reduction and its corresponding krigged map with 100% of data and; 3) the impacted area, according to each krigged map, considering each contaminated point as that with VOCs concentrations greater than 20 ppm. The sampling reduction tends to increase the RMS difference while the impacted area almost do not alters, being this effect higher for the 1,5 m depth level. Considering that the averaged range, the RMS difference and the impacted area do not change substantially with the reduction in the number of samples, until the limit of 50%, it can be recommended, for economic reasons, the reduction in the number of samples up to this limit.

Introdução

Instalações para escoamento e armazenagem de petróleo, como terminais, oleodutos e parques de tanques estão constantemente sujeitas a eventos que podem resultar na contaminação do solo e da água subterrânea. Por mais bem projetadas que sejam essas instalações, e apesar da manutenção constante e respeito às boas práticas de segurança operacional, após décadas de operação é comum se observar a ocorrência de algum impacto ambiental na área. Atualmente diversas instalações desse tipo são avaliadas e monitoradas com o objetivo de se detectar impactos causados por eventos pretéritos. Ao conjunto de ações e análises efetuadas com o objetivo de identificar e quantificar o impacto sobre o solo e a água subterrânea dá-se o nome de diagnóstico geoambiental.

Para o diagnóstico geoambiental são normalmente realizadas sondagens ambientais com coleta de amostras de solo, levantamentos geofísicos como GPR e sondagem elétrica vertical multi-eletrodos, coleta de dados hidrogeológicos (nível freático, condutividade hidráulica, determinação de parâmetros hidrodinâmicos, instalação de poços de monitoramento e coleta de amostras de água), análises geoquímicas e geotécnicas de solo e ensaios hidroquímicos.

As análises geoquímicas incluem levantamentos PID (*Photo Ionization Detection*). Um detector do tipo PID é um detector de gases. Detectores de fotoionização típicos medem compostos orgânicos voláteis e outros gases em concentrações desde 1 ppb até 10.000 ppm. O PID é o tipo de detector mais eficiente e de baixo custo para a detecção de gases. Ele é capaz de fornecer leitura instantânea ou realizar um monitoramento contínuo. Esse equipamento é muito usado para fins militares, industriais, ou para fins de segurança do trabalho em ambientes confinados (Clean Environment Brasil, 1995).

A motivação para a realização deste trabalho é a constatação de que muitos trabalhos de diagnóstico geoambiental, baseados na análise dos resultados de ensaios com PID, para identificação de possíveis zonas impactadas por atividades de escoamento e armazenagem de petróleo e seus derivados, não possuem um estudo sobre a taxa ideal de amostragem de solo para quantificação dos elementos voláteis presentes. Isto pode resultar em levantamentos com número de amostras excessivamente baixo, prejudicando a qualidade do diagnóstico, ou excessivamente elevado, aumentando desnecessariamente os custos.

Este trabalho faz uso intensivo da principal técnica geoestatística de mapeamento: a krigagem. Esta técnica se constitui numa forma sofisticada de interpolação de dados, onde a função de interpolação é dada pelo variograma, que por sua vez é a representação local da continuidade espacial do fenômeno estudado. A krigagem é considerada uma técnica BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*), ou seja, é o melhor estimador linear não-tendencioso possível de se obter com os dados disponíveis. Além de fornecer um mapa com a maior representatividade possível, a krigagem fornece também um mapa associado de variância de estimativa local, o qual representa a incerteza na estimativa de cada ponto do mapa principal (Andriotti, 2003; Guerra, 1988; Journel, 1988; Kitaniadis, 1997; Yamamoto, 1996).

Dados utilizados

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de uma investigação ambiental de uma área de armazenamento de petróleo, visando caracterizar a existência de compostos contaminantes derivados de

hidrocarbonetos, pois há na área relatos de diversas ocorrências de acidentes ambientais.

A área em estudo é constituída de sete tanques de armazenamento de petróleo em uma área de aproximadamente 20 hectares. No entanto, para fins de estimação por krigagem foi considerada uma área retangular com cerca de 36 hectares, a qual contém a área de tanques.

Foram feitas medições de VOCs em 787 pontos, a cada meio metro, ou seja, a 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m de profundidade, totalizando 2361 medições.

Os ensaios PID foram realizados com o intuito de avaliar a presença de compostos orgânicos voláteis (VOCs) através de medição direta em subsuperfície, utilizando um detector de gases portátil, que detecta vapores de hidrocarbonetos, com possibilidade de exclusão do metano. Esta característica é importante porque o metano pode ocorrer naturalmente, e se essa exclusão não for feita, pode mascarar a ocorrência dos VOCs.

Na análise dos dados considera-se que valores acima de 20 ppm são possivelmente indicativos da presença de contaminação por hidrocarboneto no substrato da área em questão. Este valor de corte foi definido com base na tabela da CETESB apresentada em Boscov (2008), assim como no relatório de investigação da área, realizado por uma empresa contratada para este fim.

Metodologia

Krigagem é um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e no tempo, a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma (Landim, 2003).

A Krigagem usa informações a partir do semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto. Como o semivariograma é uma função da distância entre locais de amostragens, mantendo o mesmo número de amostras, os pesos são diferentes de acordo com o seu arranjo geográfico.

Com a krigagem torna-se viável a melhor estimativa possível para locais não amostrados, pela minimização da variância do erro. Todavia não há garantia que o mapa obtido pela krigagem tenha o mesmo semivariograma e a mesma variância que os dados originais, pois se trata, pela própria natureza do método, de um mapa com valores suavizados.

A krigagem ordinária é um interpolador exato no sentido de que os valores interpolados irão coincidir com os valores dos pontos amostrais. A variância da krigagem ordinária fornece informação importante sobre a confiabilidade dos valores interpolados (Burrough, 1998). A técnica de krigagem ordinária supõe que os dados apresentam distribuição normal de frequências.

Neste trabalho foram gerados mapas da distribuição de VOCs, através da krigagem ordinária, nos três níveis de profundidade em que as amostras foram coletadas. Para cada nível de profundidade foi gerado um mapa utilizando 100% dos dados e mapas alternativos com 75%, 50% e 25% dos dados amostrados, segundo dois

critérios alternativos: aleatório e seqüencial. Para a geração de cada mapa foi adotado o seguinte método:

1. Adoção dos dados do levantamento PID adquiridos na área estudada.
2. Utilização do programa Enterprise Guide® para amostrar aleatoriamente os dados segundo as percentagens desejadas.
3. Geração dos arquivos de dados seqüenciais segundo as percentagens desejadas, através da manipulação dos arquivos de dados no programa Excel. Para a amostragem seqüencial com 75% dos dados efetuou-se a exclusão de 1 amostra a cada 4 do arquivo original (100% dos dados). Para a amostragem seqüencial com 50% dos dados retirou-se uma amostra a cada três do arquivo com 75% dos dados. Já para a amostragem seqüencial com 25% dos dados se excluiu uma amostra a cada duas do arquivo com 50% dos dados.
4. Análise exploratória dos dados utilizando o Programa GSLIB (Landim & Monteiro, 2000).
5. Ajuste dos variogramas utilizando o Programa GS+ for Windows (Gamma Design, 2002).
6. Krigagem dos dados utilizando o programa GSLIB.
7. Geração dos mapas de krigagem pelo GSLIB.

Por fim, foi realizado o cálculo da diferença RMS (diferença média quadrática) para todas as percentagens de amostragens aleatórias e seqüenciais em relação ao respectivo mapa krigado com 100% dos dados, através do programa Excel.

O fluxograma da Figura 1 resume, de forma esquemática, a metodologia adotada neste trabalho. Embora essa figura indique apenas a realização da análise para o nível de profundidade de 1,0 m, ela foi realizada para os três níveis. Trata-se apenas de uma simplificação gráfica do fluxograma.

A análise dos dados se deu de acordo com o seguinte procedimento: após a definição dos arquivos de dados, por nível e por método de amostragem, foi gerado o corresponde mapa de localização das amostras (módulo LOCMAP do GSLIB), os dados foram normalizados (módulo NSCORE do GSLIB), realizada a análise variográfica (geração do variograma experimental e ajuste pelos modelos teóricos) no programa GS+, krigagem ordinária da variável normalizada (módulo KT3D do GSLIB), transformação inversa dos valores krigados da variável normalizada em ppms de VOCs (módulo BACKTR do GSLIB) e, por fim, geração dos mapas de VOCs krigados (módulo PIXELPLT do GSLIB).

Para quantificar a semelhança entre os mapas krigados com um certo percentual x de amostras em relação aos mapas obtidos com 100% dos dados, foi adotada a diferença RMS (*Root Mean Square*). A diferença RMS indica o quanto um mapa difere, em média, do outro. Ela é definida, em ppm, pela equação (1).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (VOC_{x\%i} - VOC_{100\%i})^2}{n}} \quad (1)$$

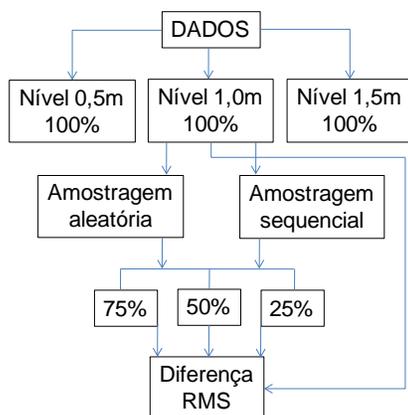


Figura 1 - Fluxograma com a rotina de trabalho adotada neste trabalho.

A fim de estimar o percentual de área impactada nos mapas obtidos neste trabalho, considerou-se que, 1) de acordo com a tabela da CETESB (Boskov, 2008), as concentrações mínimas de VOCs que exigem intervenção em ambiente industrial variam de 0,15 ppm a 95 ppm, de acordo com a substância considerada; 2) o valor de corte adotado no relatório de investigação da área foi de 20 ppm para VOCs em solo; este foi o valor de corte adotado neste trabalho para definir se uma área está ou não impactada pela presença de compostos orgânicos voláteis no solo.

Resultados

Nível de profundidade 0,5 metro

A Figura 2 apresenta o mapa krigado usando todas as 787 amostras obtidas no nível de profundidade 0,5m, de acordo com a metodologia adotada neste trabalho (vide Figura 1). Os mapas krigados neste trabalho são compostos por 360 mil pixels, cada um com área de 1 m x 1 m. O mapa krigado apresenta um padrão de distribuição de valores que respeita os valores amostrados. A quantificação do volume de contaminantes a extrair da área fica facilitada em relação ao que se dispunha antes da análise geostatística. Na Figura 2 pode-se observar uma maior concentração de VOCs na porção sul-sudoeste, próximo aos tanques TQ-303, TQ-304 e TQ-305.

Nível de profundidade 1,0 metro

A Figura 3 apresenta o mapa krigado usando todas as amostras obtidas no nível de profundidade 1,0 metro. Observa-se que neste mapa há uma indicação de maior concentração de VOCs no entorno dos tanques localizados na porção sul da área e a leste do TQ-301. Além disso, percebe-se um aumento da área impactada em relação ao nível 0,5 m.

Amostragem aleatória

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam os mapas krigados obtidos com 75%, 50% e 25% das amostras, respectivamente, com escolha aleatória, para o nível de profundidade 1,0 m. As diferenças RMS entre esses mapas krigados e o mapa com 100% dos dados (Figura

3) foram de 0,57 ppm, 0,70 ppm e 0,74 ppm, respectivamente.

Em relação ao mapa krigado da Figura 3, observa-se que há uma redução da área impactada com a redução no número de amostras, como também a contaminação tende a se manter apenas na porção sul-sudoeste do mapa.

Amostragem sequencial

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam os mapas krigados obtidos com 75%, 50% e 25% das amostras, respectivamente, com escolha sequencial, para o nível de profundidade 1,0 m. Os valores de diferença RMS entre esses mapas krigados e o mapa da Figura 3 foram de 0,63 ppm, 0,70 ppm e 0,84 ppm, respectivamente. Estes valores são da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos para os mapas com amostragem aleatória. Os mapas krigados com amostragem sequencial apresentam comportamento semelhante àqueles com escolha aleatória, exceto que mantêm a contaminação a leste do TQ-301.

Nível de profundidade 1,5 metro

A Figura 10 apresenta o mapa krigado para a concentração de VOCs, obtido com 100% das amostras do nível 1,5 metro. Observa-se que neste mapa há a indicação de uma maior concentração de VOCs no entorno dos tanques localizados na porção sul e do TQ-301, bem como um aumento substancial da área impactada em relação aos níveis mais superficiais.

Análise dos variogramas

A fim de analisar a robustez dos semivariogramas utilizados neste trabalho, especialmente para o caso da amostragem aleatória, foram construídos vários semivariogramas, sendo que para o nível 0,5 m foram quatro, um para cada amostragem aleatória. A Figura 11 apresenta o alcance médio para todos os conjuntos de dados utilizados neste trabalho. Observar que, além das percentagens normalmente utilizadas para amostragem (100%, 75%, 50% e 25%), foram realizadas também amostragens aleatórias com 90%, 80%, 70%, 60%, 40% e 30%. Isto foi feito com o objetivo de dar representatividade estatística à análise variográfica. Nesta figura observa-se que o alcance médio é aproximadamente constante para todas as amostragens com um número de amostras entre 100% e 50%. Para um número de amostras inferior a 50% podem ocorrer alterações consideráveis no valor desse parâmetro, com uma tendência de rápido crescimento com a redução do número de amostras.

Diferença RMS

Com o objetivo de quantificar a diferença entre os mapas krigados com redução de amostras em relação aos mapas obtidos com 100% dos dados, foi adotada a diferença RMS, conforme definida na equação (1). Como exemplo, a Figura 12 apresenta os valores de diferença RMS para quatro amostragens aleatórias e uma sequencial, no nível de profundidade 0,5 m. Observa-se nesta figura que a diferença RMS nesse nível de profundidade apresenta uma taxa de crescimento

aproximadamente constante e linear com a redução do número de amostras, para os dois tipos de amostragem.

Varição na área impactada

Com o objetivo de avaliar a variação na área impactada (concentrações de VOCs acima de 20 ppm) como resultado do processo de redução do número de dados, foram obtidos os valores apresentados na Figura 13, para os três níveis de profundidade investigados. Deve-se ressaltar que o percentual de área impactada considera toda a área krigada, o que excede a área de tanques.

O efeito da redução do número de amostras em relação à área impactada foi muito pequeno para os níveis de profundidade de 0,5 m e 1,0 m. No entanto se observa um aumento expressivo da área impactada, para o nível de profundidade 1,5 m, como resultado da redução do número de amostras, para ambas as amostragens (aleatória e seqüencial). Esse fenômeno também pode ser observado diretamente nos mapas krigados, exceto para aqueles com 25% dos dados originais.

Conclusões

Foram realizadas modelagens geoestatísticas dos dados coletados usando dois métodos independentes de amostragem: aleatória e seqüencial. As amostras foram coletadas em três níveis de profundidade: 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m. Para o nível 0,5 m foram realizadas quatro amostragens aleatórias independentes e uma amostragem seqüencial. Os resultados obtidos para as quatro amostragens aleatórias demonstraram que o comportamento observado, em termos de alcance médio e diferença RMS, são aproximadamente iguais. Portanto, uma única amostragem aleatória é suficiente para representar o comportamento da distribuição espacial dos compostos orgânicos voláteis com a redução no número de amostras considerado.

De modo geral, os mapas krigados indicam que a contaminação se concentra principalmente na parte sudoeste da área e a leste do TQ-301.

Os mapas krigados obtidos neste trabalho apresentam um padrão de distribuição de valores de VOCs que respeita os valores amostrados. A quantificação do volume de contaminantes fica, assim, facilitada pela disponibilidade dos mapas krigados.

Em termos da variografia, o alcance médio determinado para todos os três níveis de profundidade ficou em torno de 20 m, exceto para os casos cujo número de amostras ficou reduzido a 25% dos dados originais. Neste caso o alcance aumentou na maioria das amostragens, como esperado, e diminuiu no caso da amostragem aleatória para o nível 1,5 m.

A diferença RMS entre os mapas krigados com redução do número de amostras em relação aqueles krigados com 100% das amostras tende a aumentar com a redução do número de amostras. No entanto, a diferença RMS máxima observada foi de 2,33 ppm, quando o limite máximo considerado para não intervenção foi de 20 ppm.

O efeito da redução do número de amostras em relação à área impactada foi, em geral, muito pequeno, independente do método de amostragem, sendo sensivelmente maior para o nível de profundidade 1,5 m. No nível mais profundo analisado (1,5 m) a área impactada é muito maior do que aquela observada nos níveis mais rasos, exceto para os mapas obtidos com 25% dos dados originais.

Considerando que o alcance médio, a diferença RMS e a área impactada, não se alteram substancialmente com a redução no número de dados até o limite de 50%, pode-se recomendar, por razões econômicas, a redução no número de amostras até esse limite. Reduções maiores que 50% produzem mapas sensivelmente diferentes daqueles obtidos com 100% dos dados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFCG e à CAPES pela concessão de bolsa de estudos para o primeiro autor. Os autores agradecem ainda o apoio logístico cedido pelo convênio entre a UFCG e a Rede Petrobras de Geofísica.

Referências

- Andriotti, J. L. S. Fundamentos de estatística e geoestatística. Rio Grande do Sul, Unisinos, 2003.
- Boskov, M. E.G. Geotecnia Ambiental. São Paulo. Oficina de textos, 2008.
- Burrough, P. A. Principles of geographical information systems. Oxford University Press, New York, 1998.
- Clean Environment Brasil. Produtos e tecnologias para o meio ambiente. 1995. Disponível em: <<http://www.clean.com.br/porta/detectores-portateis-para-seguranca-do-trabalho/gasalertmicro-5-pid>>. Acesso em 15 abr. 2010.
- Gamma Design. GS+ for Windows Demonstration Version 5.3. Plainwell, Michigan, USA: Gamma Design Software, 2002.
- Guerra, P. A. G. Geoestatística operacional. DNPM, Distrito Federal, 1988.
- Journel, A.G. Geostatistics for environmental sciences. Las Vegas, Environmental Protection Agency, 1988.
- Kitanidis, P. K. Introduction to geostatistics – Applications in hydrogeology. Cambridge University Press, 1997.
- Landim, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. 2.ed. São Paulo, Editora Unesp, 2003.
- Landim, P. M. B.; Monteiro, R. C. Introdução ao GSLIB (Geostatistical Software Library/UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 01, 2000. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. Acesso em 15 Jun. 2009.
- Yamamoto, J.K. Avaliação e classificação de reservas minerais. Editora da Universidade de São Paulo, 1996.

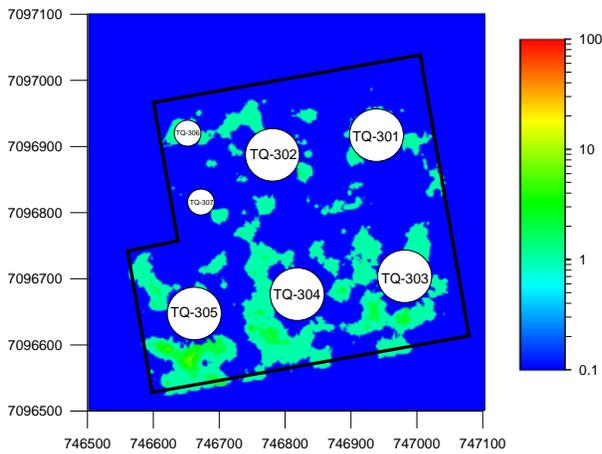


Figura 2 - Mapa krigado para ocorrência de VOCs (ppm) no nível 0,5 m com 100% dos dados.

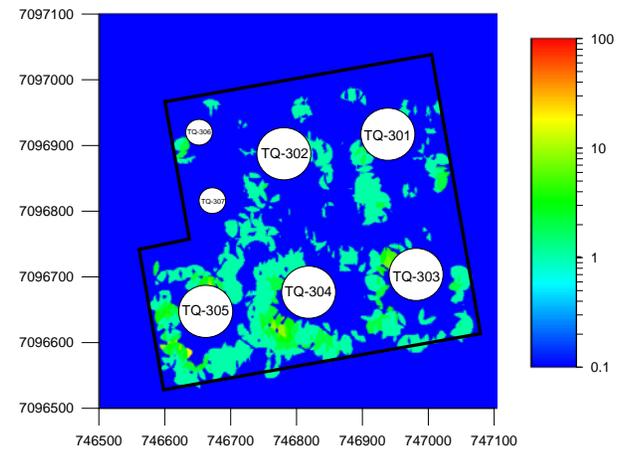


Figura 5 - Mapa krigado para a ocorrência de VOCs (ppm) para amostragem aleatória no nível 1,0 m com 50% dos dados.

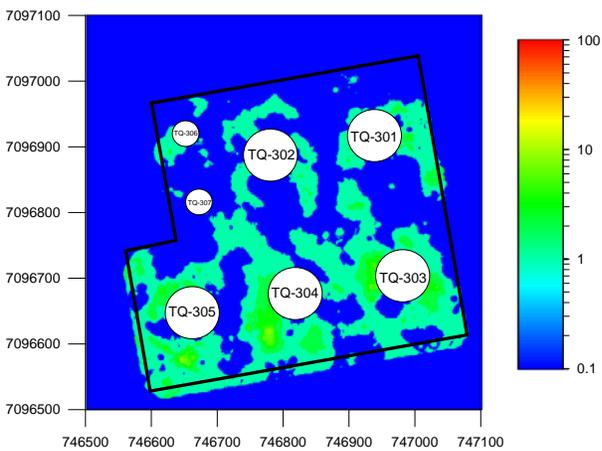


Figura 3 - Mapa krigado para ocorrência de VOCs (ppm) no nível 1,0 m com 100% dos dados.

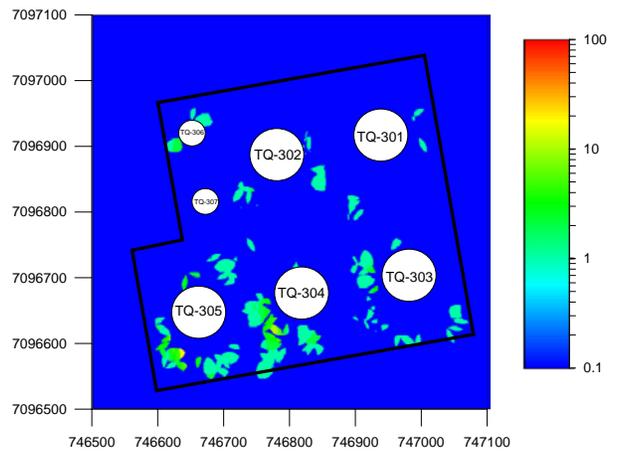


Figura 6 - Mapa krigado para a ocorrência de VOCs (ppm) para amostragem aleatória no nível 1,0 m com 25% dos dados.

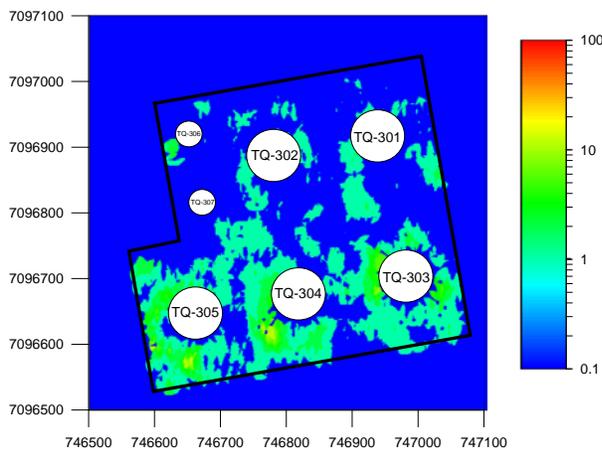


Figura 4 - Mapa krigado para a ocorrência de VOCs (ppm) para amostragem aleatória no nível 1,0 m com 75% dos dados.

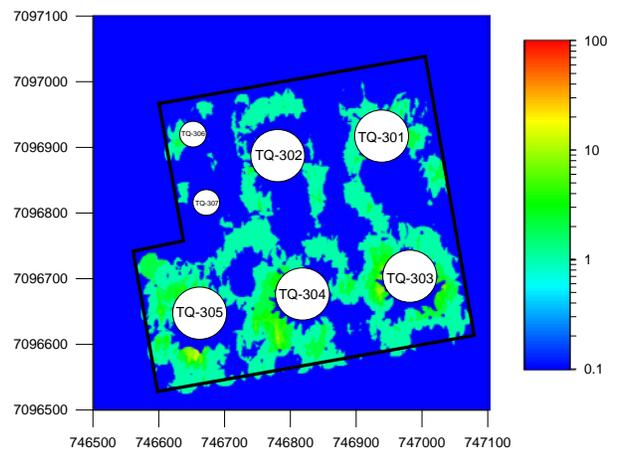


Figura 7 - Mapa krigado para a ocorrência de VOCs (ppm) para amostragem seqüencial no nível 1,0 m com 75% dos dados.

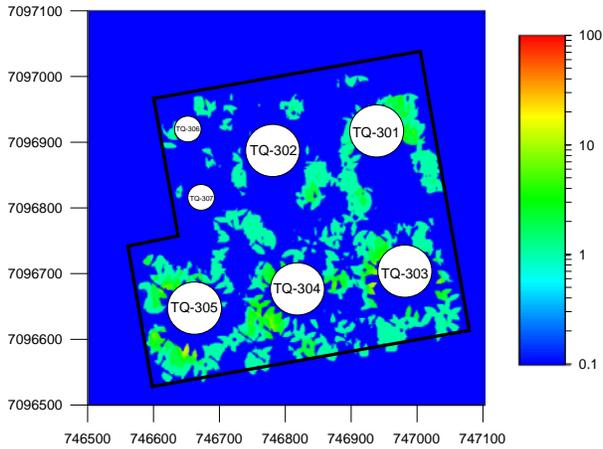


Figura 8 - Mapa krigado para a ocorrência de VOCs (ppm) para amostragem seqüencial no nível 1,0 m com 50% dos dados.

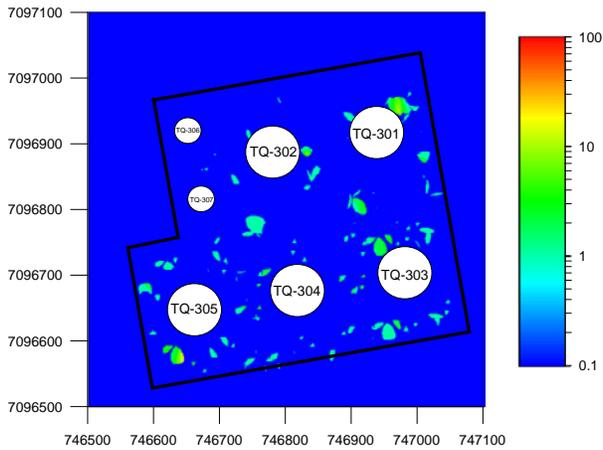


Figura 9 - Mapa krigado para a ocorrência de VOCs (ppm) para amostragem seqüencial no nível 1,0 m com 25% dos dados.

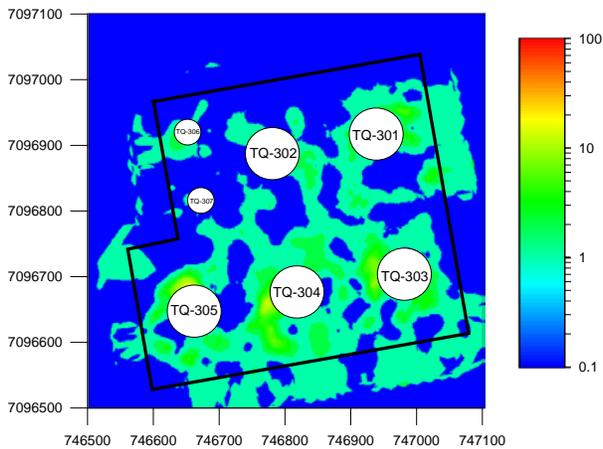


Figura 10 - Mapa krigado para ocorrência de VOCs (ppm) no nível 1,5 m com 100% dos dados.

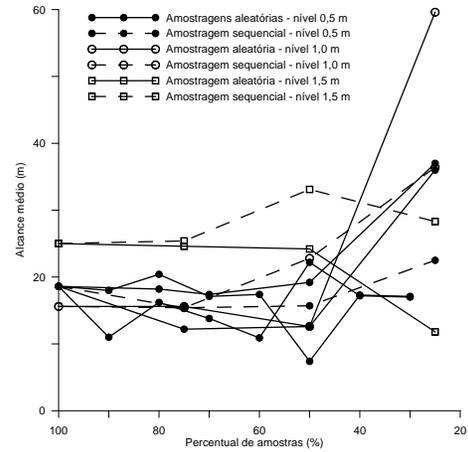


Figura 11 - Alcançe médio (m) dos semivariogramas utilizados para geração dos mapas de concentração de VOCs.

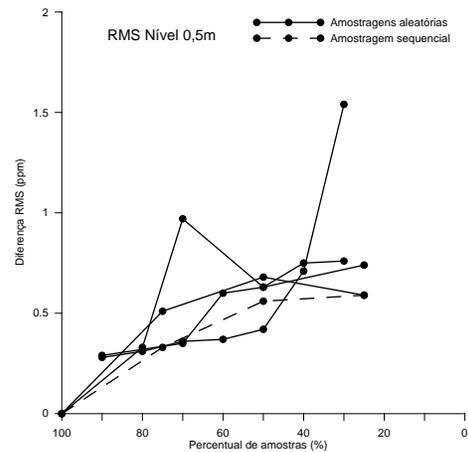


Figura 12 - Diferença RMS (ppm) dos mapas krigados com redução de amostras em relação ao mapa krigado com 100% dos dados, na profundidade 0,5 m.

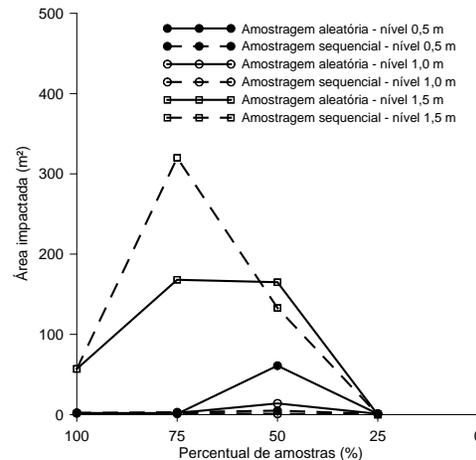


Figura 13 - Área impactada (com concentrações de VOCs acima de 20 ppm) nos mapas krigados, como função da redução no número de amostras